

Contributos para a conservação das estruturas do património construído de valor cultural

Paulo B. Lourenço
Professor Catedrático
ISISE
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
P – 4800-058 Guimarães
pbl@civil.uminho.pt

Nos últimos anos ocorreram desenvolvimentos muito significativos no que diz respeito à capacidade de efetuar análises experimentais e simulações em computador sobre o património construído de valor cultural. Tais avanços resultam de uma crescente consciencialização por parte da sociedade em relação à necessidade de preservação deste património, juntamente com a evidente importância cultural e económica desta atividade.

A conservação das estruturas do património construído com valor cultural, devido à sua natureza e história, é um desafio complexo que exige uma metodologia adequada, com um processo iterativo entre as etapas de reconstituição do historial da construção, diagnóstico (com recurso a meios de inspeção) e avaliação de segurança (com recurso a ferramentas avançadas de análise de estabilidade), definição e execução das medidas de intervenção (se necessárias), e controlo da intervenção. A atividade do grupo HMS da Universidade do Minho (“Historical and Masonry Structures”) desenvolve-se essencialmente em cinco grandes áreas do conhecimento: (a) Análise do ciclo de vida, durabilidade e segurança; (b) Engenharia sísmica; (c) Ensaios não-destrutivos e monitorização; (d) Materiais e tecnologias de construção inovadores; (e) Reparação e reforço. Apresenta-se, em seguida, uma muito breve revisão de trabalhos de doutoramento que ilustram contributos para a conservação do património.

1. Avaliação de Segurança das Estruturas Antigas de Madeira (Ricardo Brites, 2011)

Neste trabalho desenvolveram-se métodos de caracterização geométrica e mecânica de estruturas de madeira existentes, através de uma série de levantamentos geométricos a estruturas históricas, que permitiram estabelecer padrões de variabilidade, Figura 1a, e caracterização mecânica através de um método semi-destrutivo de avaliação do módulo de elasticidade longitudinal e da tensão de rotura à tração, Figura 1b. Este método inclui a extração de provetes da estrutura, denominados de mesoprovetes, tendo-se procedido à sua calibração para a madeira de pinho bravo e castanho. As relações empíricas obtidas entre propriedades mecânicas determinadas em ensaios de mesoprovetes e ensaios normalizados mostram uma boa concordância em termos de módulo de elasticidade, com relações próximas da unidade. Já em termos de tensão de rotura à tração paralela ao fio, a relação é mais baixa, devido à maior propensão dos resultados obtidos nos ensaios dos mesoprovetes serem afetados por fenómenos localizados.

Foram ainda obtidos resultados relativos à influência da degradação biológica provocada por fungos nas propriedades mecânicas da madeira, Figura 1c. A avaliação das implicações mecânicas da degradação biológica da madeira é um campo pouco

estudado. A abordagem adotada foi o método de redução de secção, em que é determinada uma função de degradação que relaciona a profundidade de ataque com o tempo de exposição da peça a condições propícias ao desenvolvimento do fungo. Foram desenvolvidos métodos de deterioração de provetes de várias secções transversais e destinados a ensaios de tração e compressão paralelas ao fio, de modo a avaliar a influência de parâmetros como o tempo de exposição e relação área-perímetro da secção transversal da peça.

Finalmente, procedeu-se à implementação computacional de técnicas probabilísticas para aferição da segurança estrutural, considerando de forma explícita a variabilidade inerente a cada grandeza interveniente no problema. Com o software desenvolvido, foram estudadas três estruturas: uma relativa a uma cobertura, outra relativa a um frontal pombalino e uma terceira relativa a um pavimento de madeira, Figura 1d. Os resultados obtidos permitiram avaliar não só o estado de segurança dos seus elementos constituintes mas também apontar aqueles elementos em que uma intervenção de reforço seria mais vantajosa em termos de incremento da segurança global da estrutura.

2. Análise Numérica de Estruturas de Alvenaria Reforçadas com FRP (Claudio Maruccio, 2011)

As estruturas de alvenaria têm sido usadas desde sempre na construção, mas o seu envelhecimento, a degradação material, os assentamentos e as alterações estruturais têm levado à necessidade do seu reforço para garantir um desempenho adequado. Neste contexto, o uso de materiais compósitos com matriz polimérica (FRP) aplicados externamente no reforço de estruturas pode ser uma solução viável, desde que respeite o valor cultural da construção.

Apesar dos esforços de investigação dos últimos anos, a análise sísmica de estruturas de alvenaria reforçadas com FRP ainda carece de modelos numéricos precisos e mais eficientes. Na Figura 2a apresenta-se um colapso fora do plano típico do sismo de L'Áquila, Itália, que demonstra a necessidade de reduzir a vulnerabilidade destas estruturas. Neste trabalho foram desenvolvidas ferramentas de simulação computacional para representar o reforço com FRP em estruturas de alvenaria, nomeadamente um modelo adequado à modelação do comportamento da interface FRP-alvenaria. Este modelo permite avaliar a influência de diversos parâmetros que influenciam a aderência, tendo sido ainda aplicado a arcos e paredes, ver Figura 2b,c.

A micro-modelação foi posteriormente usada para avaliar o comportamento global de um outro tipo de elemento, implementado no programa OpenSees, ver Figura 2c. Este novo elemento é adequado à análise sísmica de edifícios em alvenaria pois reduz o número de graus de liberdade do modelo estrutural. A abordagem proposta foi validada através da comparação com os resultados obtidos de acordo com os modelos propostos na recente normativa italiana, modificado e ampliado para incluir o efeito do reforço com generalizado para incluir o reforço com FRP. Os resultados numéricos fptam validados por comparação com os resultados experimentais realizados na Universidade de Pavia (Itália) e no Instituto de Tecnologia da Geórgia (EUA), ver Figura 2d. De uma forma geral, obtiveram-se resultados experimentais e numéricos a nível global comparáveis, com elevada eficiência do ponto de vista computacional, que permitiu analisar a complexidade do conjunto em alvenaria, incluindo os efeitos cíclicos das ações e o reforço com FRP.

3. Identificação Estrutural Dinâmica Utilizando Redes de Sensores Sem Fios (Rafael Aguilar, 2010)

O uso de técnicas de monitorização em edifícios de carácter histórico começou a ser estudada na Universidade do Minho na última década devido ao interesse na utilização de técnicas não destrutivas que forneçam contributos para compreender o comportamento destas estruturas. Este trabalho explorou a possível inclusão dos sistemas de sensores sem fios na Análise Modal Operacional de estruturas existentes, ver Figura 3a. Desenvolveu-se também uma nova metodologia remota e automática para o processamento dos dados.

Inicialmente, foram exploradas as possibilidades das plataformas comerciais sem fios existentes do mercado. Os resultados dos ensaios realizados mostraram que estas plataformas não têm aplicação direta na identificação ou monitorização dinâmica de estruturas de alvenaria. Os principais motivos são a baixa resolução dos acelerómetros e conversores analógicos - digitais disponíveis, além da ausência de implementação de um protocolo de comunicação, o qual garantiria não só a sincronização entre nós mas também um processo fiável de comunicação entre eles. Uma vez identificadas as limitações das plataformas comerciais, uma equipa envolvendo engenheiros eletrotécnicos e de comunicações desenvolveu um novo sistema de monitorização sem fios visando cumprir os exigentes requisitos dos ensaios Modais Operacionais em estruturas existentes. Os resultados dos ensaios de validação provaram o excelente desempenho deste, comparável com o dos sistemas convencionais com fios, em situações com vibrações superiores a 0.10 mg, ver Figura 3b.

Foram ainda apresentados novos desenvolvimentos no processamento de dados nos processos de monitorização dinâmica, ver Figura 3c. Devido a grande quantidade de informação recolhida nestes processos, a utilização está sujeita ao uso de ferramentas automáticas para o seu tratamento. Neste sentido, propôs-se um novo algoritmo de identificação remota e automática, baseado na interpretação dos resultados dos métodos de identificação paramétrica. Os resultados dos ensaios numéricos e laboratoriais demonstraram a eficácia do algoritmo desenvolvido com estimações precisas e fiáveis. O algoritmo foi ainda testado no estudo de uma igreja do século XIX, tendo os resultados confirmado a eficácia do algoritmo desenvolvido.

3. Metodologia integrada para avaliação e mitigação da vulnerabilidade sísmica das construções históricas em alvenaria. A igreja dos Jerónimos como caso de estudo (João Roque, 2010)

Este trabalho pretendeu fornecer um contributo para promover a conservação, reabilitação e reforço das construções históricas em alvenaria através de uma metodologia própria, que procure minimizar a extensão e a intrusividade das intervenções, mas que garanta as indispensáveis condições de segurança. Propôs-se assim uma metodologia multidisciplinar e integrada cujo lema é “maximizar a investigação para minimizar a intervenção” e onde se dá primazia à observação da construção, baseada na auscultação e na monitorização estrutural, e à prática de intervenções faseadas e interativas com os resultados. A engenharia de estruturas desempenha um papel fulcral funcionando como o elemento integrador da metodologia.

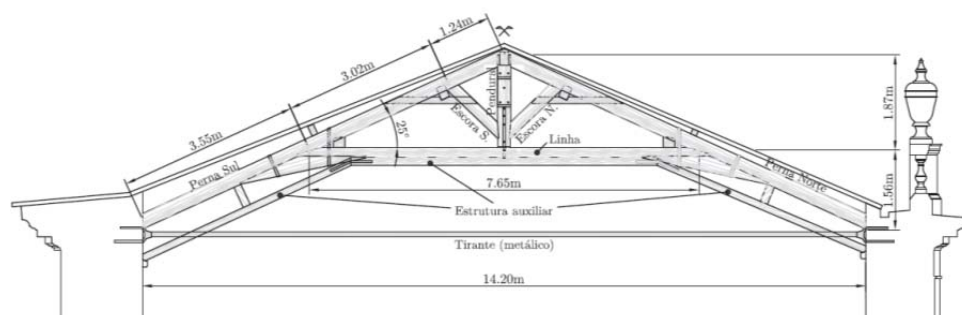
Como passos principais da metodologia proposta destacam-se: (i) pesquisa, compilação e análise de dados históricos relevantes para a caracterização genérica da construção; (ii) instalação de sistemas de monitorização estática e dinâmica; (iii) caracterização mecânica dos materiais e/ou de elementos estruturais;

(iv) identificação dinâmica da estrutura; (v) caracterização da ação sísmica, desde a identificação de potenciais áreas sismogénicas, que condicionam a perigosidade geográfica, até à geração artificial de acelerogramas incluindo a consideração dos efeitos de sítio; (vi) desenvolvimento de modelos de simulação numérica do comportamento estrutural, calibrados a partir de danos identificados e de resultados experimentais; (vii) análises estáticas não-lineares do tipo “pushover” e de análises dinâmicas não-lineares, no domínio do tempo, para diferentes níveis de perigosidade sísmica, consistentes com o enquadramento tectónico regional; (viii) identificação da capacidade e das vulnerabilidades estruturais, dos modos de colapso e avaliação da segurança; (ix) recomendações para minimizar risco sísmico das construções, incluindo propostas de eventuais soluções de intervenção para a conservação/reabilitação ou reforço.

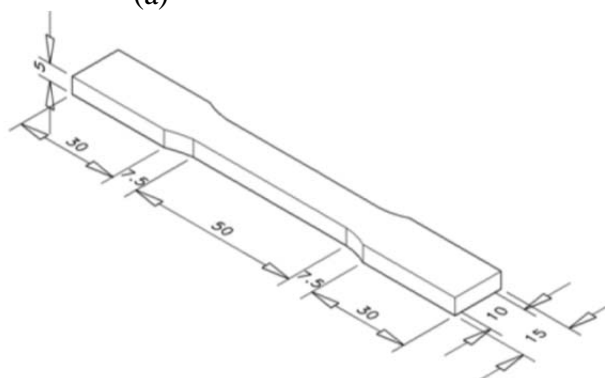
A metodologia proposta foi aplicada a um caso de estudo emblemático, constituído pela Igreja de Santa Maria de Belém, como parte integrante do complexo do Mosteiro dos Jerónimos, em Lisboa. Apresentam-se e discutem-se os resultados mais relevantes do estudo efetuado, na sequência da aplicação da metodologia, através dos quais se sustenta o diagnóstico da construção. Para as simulações numéricas do comportamento dinâmico da Igreja recorreu-se a sinais sísmicos artificiais correspondentes a três cenários sísmicos de perigosidade crescente traduzida por períodos de retorno com 475, 975 e 5000 anos, ver Figura 4. Finalmente, tendo presente o elevado valor patrimonial da construção, propuseram-se, analisaram-se e discutiram-se possíveis estratégias de intervenção/reforço com vista à redução das vulnerabilidades identificadas e à mitigação do risco sísmico da Igreja.

4. Conclusões

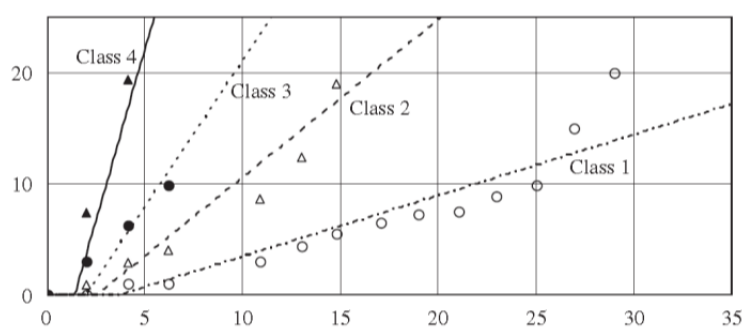
A conservação do património construído com valor cultural é hoje um tema muito atual nas sociedades modernas. A Escola de Engenharia da Universidade do Minho possui uma atividade reconhecida internacionalmente nesta área, apresentando-se aqui um breve resumo de teses de doutoramento selecionadas e concluídas nos últimos dois anos.



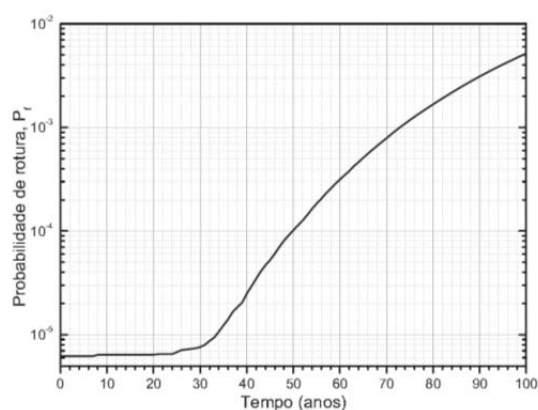
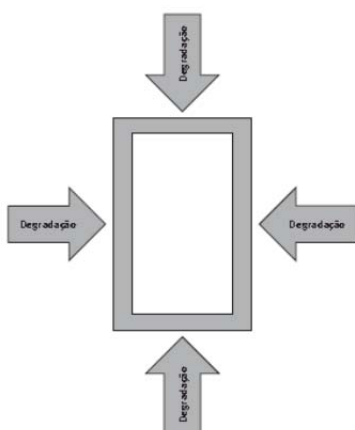
(a)



(b)



(c)

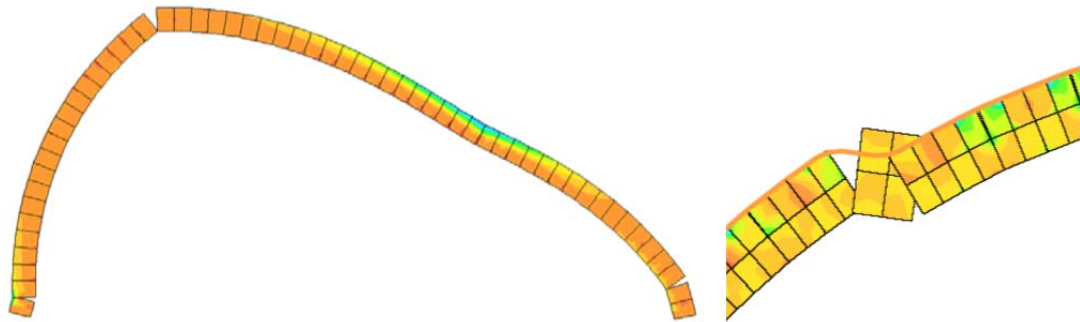


(d)

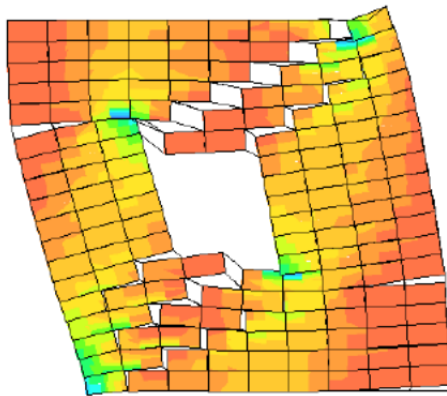
Figura 1 – Avaliação da segurança de estruturas de madeira: (a) levantamento geométrico detalhado das secções (a cada 0.50 m); (b) corte e dimensões nominais em milímetros dos mesoprovetes; (c) coluna de degradação desenvolvida e resultados típicos de deterioração em madeira (profundidade vs. tempo); (d) variação de segurança no tempo para uma asna sujeita a deterioração elevada.



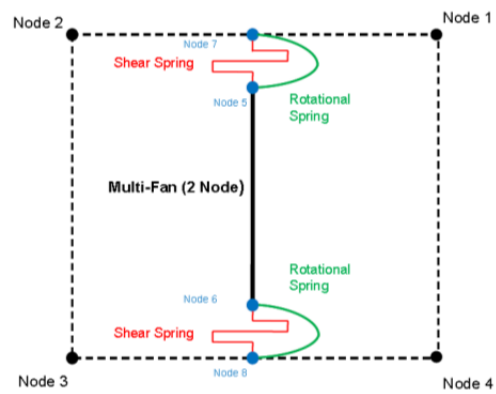
(a)

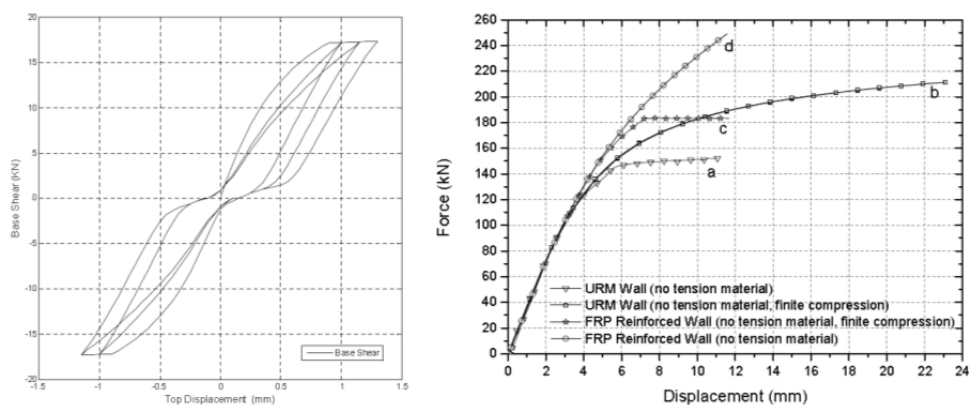


(b)



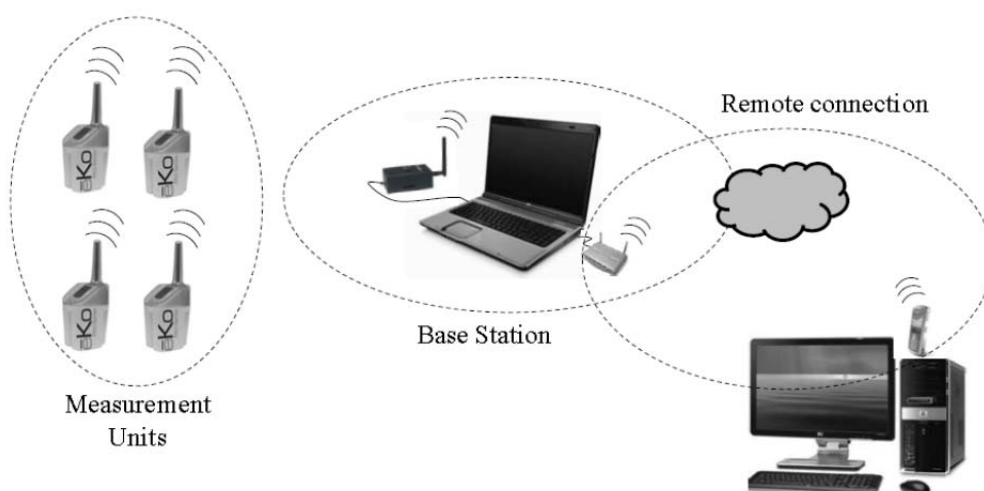
(c)



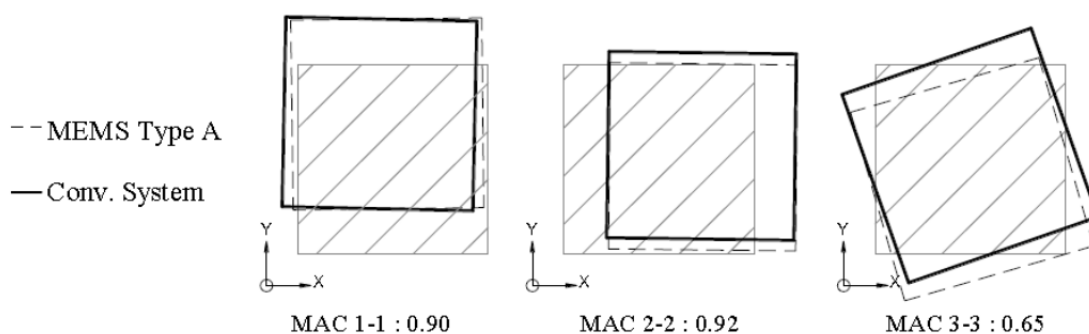


(d)

Figura 2 – Avaliação da segurança de estruturas de alvenaria reforçadas com FRP: (a) exemplos de danos no sismo de L'Áquila, Itália; (b) simulação de um arco de alvenaria, sem e com reforço FRP; (c) simulação de uma parede de alvenaria com micromodelo e macromodelo proposto; (d) resultado de um edifício de alvenaria submetido a ações cíclicas e a reforço com FRP (macromodelo).



(a)



(b)

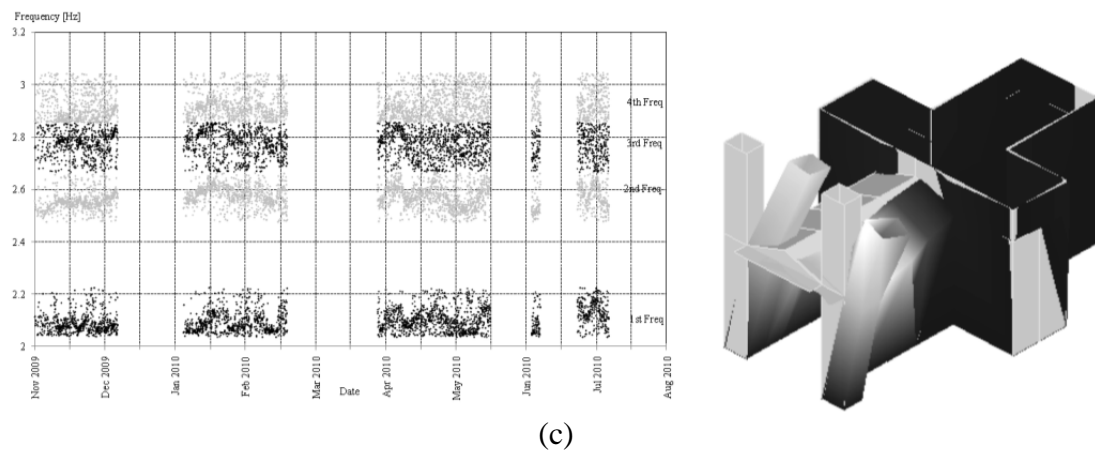


Figura 3 – Identificação e monitorização dinâmica sem fios: (a) visualização do sistema; (b) comparação entre um sistema tradicional e o novo sistema com protótipo que inclui sincronização; (c) sistema automático de identificação de frequências.

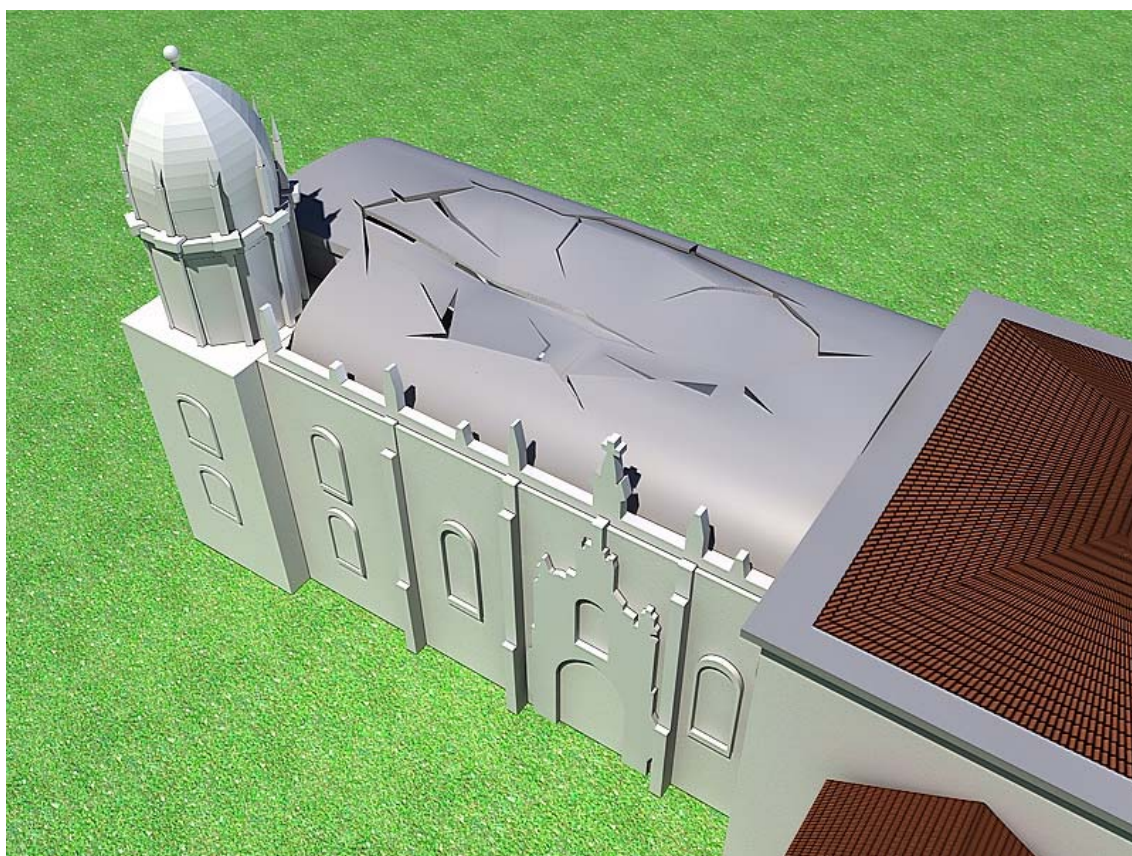




Figura 4 – Simulação computacional do colapso da igreja do Jerónimos sob ações verticais e horizontais.